

Голові разової спеціалізованої вченої
ради Інституту ядерних досліджень
НАН України
доктору фізико-математичних наук,
старшому науковому співробітнику,
завідуючому відділом теорії ядра
Інституту ядерних досліджень
НАН України,
Федорові Олексійовичу Іванюку

РЕЦЕНЗІЯ

доктора фізико-математичних наук, старшого наукового співробітника
відділу теорії ядра Інституту ядерних досліджень НАН України
Магнера Олександра Григоровича
на дисертацію Шаульського Костянтина Андрійовича
«Квантові релятивістські методи опису ядерних процесів у компактних зорях»,
поданої на здобуття наукового ступеня доктора філософії
у галузі знань “10 Природничі науки”
за спеціальністю “104 Фізика та астрономія”

1. Актуальність обраної теми дисертаційної роботи

Дисертаційна робота представляє результати теоретичного дослідження ядерних процесів в компактних зорях. Теоретичні моделі для ядерних процесів в середовищі компактних зір є дуже важливими для розуміння їх еволюції. Також, в дисертаційній роботі досліджуються квантові ефекти, такі як гальмівне випромінювання при процесах розсіяння нуклонів на ядрах, що може принести вклад в аналіз майбутніх експериментів з такими процесами.

Ядерні реакції та їх ефекти, досліджені в дисертаційній роботі, можуть бути використані для покращення нашого розуміння структури компактних зір: білих карликів та нейтронних зір. Пікноядерні реакції – реакції злиття ядер в кристалічних ґратках компактних зір (білих карликів та нейтронних зір) при низьких температурах є важливим процесом для нашого розуміння еволюції таких космічних об’єктів. Експериментальні дані при дослідженні гальмівного випромінювання можуть дозволити краще зрозуміти ядерні сили та їх властивості. В дисертаційній роботі побудовано декілька моделей, за допомогою яких досліджувалися процеси розсіяння нуклонів на ядрах з врахуванням гальмівного випромінювання, а також вплив екстремальних

умов всередині компактної зорі на такі процеси. Тому дослідження, представлені в дисертації, безсумнівно актуальні.

2. Оцінка структури дисертації, її наукового рівня та обґрунтованості/достовірності положень, що в ній сформульовані

Представлена дисертаційна робота має сумарно 113 сторінок, містить структурно оформлені анотацію (українською та англійською мовами), вступ, три розділи, висновки, список використаних джерел та один додаток. Структура роботи і викладення матеріалу є логічними і зрозумілими.

У **вступі** обґрунтовано актуальність тематики роботи, описано мету і завдання, об'єкт і предмет досліджень для аналізу різних ядерних реакцій в компактних зорях. Представлено мотивацію наукового дослідження, а саме необхідності побудови нових моделей для опису та аналізу ядерних процесів в компактних зорях. Особлива увага приділяється перевагам підходу здобувача в порівнянні з попередніми дослідженнями. Здобувачем описано використані методи наукового дослідження, вказано новизну, теоретичне та практичне значення проведеного дослідження.

У **першому розділі** розглядаються пікноядерні реакції – реакції злиття атомних ядер в кристалічних ґратках компактних зір (білих карликів та нейтронних зір) за низьких температур. Описано основи методу багаторазових внутрішніх відбиттів (БВВ), який використовувався для розрахунку коефіцієнтів проникності через бар'єр та ймовірностей злиття при таких реакціях. Наведені дані розрахунків, які порівнювалися з попередніми результатами, отриманими раніше при дослідженні пікноядерних реакцій квазікласичними методами. Обґрунтовано переваги методу БВВ для дослідження пікноядерних реакцій над квазікласичними методами.

У **другому розділі** розглядається процес розсіяння протону на дейтроні з випромінюванням гальмівних фотонів. Для цього було побудовано модель процесу на основі дво- та три-кластерних моделей. В розділі наведено дво- та три-кластерні моделі, а також методи розрахунку хвильових функцій дейтрону та протон-дейтронної системи. Показано залежність хвильових функцій від параметрів моделей та від вибраних потенціалів ядерної взаємодії. Наведено теорію гальмівного випромінювання та розрахований його спектр для різних енергій. Є порівняння з експериментальними даними.

У **третьому розділі** розглядається ядра в середовищі компактних зір – білих карликів та нейтронних зір – та досліджується вплив екстремальних умов на енергію зв'язку ядер та на процеси розсіяння нуклонів на ядрах. Для розв'язку поставлених задач використовується модель деформованих

осциляторних оболонок (ДОО), яка була модифікована для врахування взаємодії з середовищем зорі. Аргументується вибір такого підходу для дослідження ядер. Наведені результати розрахунків для компактних зір, порівнюються з астрономічними спостереженнями. Було виконано дослідження впливу середовища на енергію зв'язку парно-парних ядер та показано, що зі збільшенням глибини, на якій ядро знаходиться, енергія зв'язку збільшується. Такі розрахунки були проведені для парно-парних ядер до ^{56}Fe , і зроблено висновок, що легші ядра можуть існувати в глибших шарах нейтронної зорі, ніж більш важкі. Були досліджені процеси розсіяння протонів та нейтронів на ядрах в середовищі компактної зорі та розраховані спектри гальмівного випромінювання. При цьому показано вплив зіркової матерії на розраховані спектри.

У **висновках** підбито підсумки всіх розв'язаних задач, вказано теоретичне та практичне значення отриманих результатів.

Робота виконана на високому, професійному рівні, з описом всіх використаних сучасних моделей, їх модифікацій, та аргументацією застосування. Використовуються сучасні методи розрахунків та аналізу результатів, є порівняння з експериментальними даними. Високий рівень здобутків підтверджується апробацією результатів на 5-ти наукових конференціях та публікацією у 4-ох престижних наукових журналах з обов'язковим рецензуванням та в українському фаховому виданні високого рівня.

3. Наукова новизна одержаних результатів

Вперше досліджено пікноядерні реакції в умовах зоряного середовища компактних зір за допомогою методів квантової механіки, більш загальних, ніж ВКБ наближення та наближень, що використовуються в інших підходах. Розраховані швидкості пікноядерних реакцій суттєво відрізняються від оцінок, отриманих попередніми методами. Вперше досліджено ймовірності утворення складених ядер у процесі злиття ізотопів карбону у зоряному середовищі. Побудована модель на основі методу багаторазових внутрішніх відбиттів не має обмежень, які мають інші методи з використанням ВКБ наближення при вивченні розсіяння ядер на потенціалі ядра мішені та їх злиття. Вперше досліджено вплив плазмового екранування на взаємодію ізотопів в кристалічній ґратці. Побудована модель є багатообіцяючою для майбутніх досліджень та розрахунків пікноядерних реакцій в компактних зорях. Вперше досліджено також гальмівне випромінювання при протон-дейтронному розсіянні на основі дво- та три-кластерних моделей. Отримано

залежність перерізів гальмівного випромінювання від параметрів, що описують дейтрон та ядерні сили.

Побудовано нову теоретичну модель, яка вперше дозволяє розрахувати вплив середовища компактних зір (білих карликів та нейтронних зір) на енергію зв'язку ядер, що знаходяться у такому середовищі. Вперше досліджено вплив матерії зорі на розсіяння протонів та нейтронів на ядрах в такому середовищі та на інтенсивність супроводжуючого гальмівного випромінювання.

4. Теоретичне та практичне значення одержаних результатів.

Розроблена модель пікноядерних реакцій на основі методу багаторазових внутрішніх відбиттів може бути використана для більш точних оцінок швидкостей реакцій в кристалічних ґратках нейтронних зір для багатьох ядер. Метод має вагомі переваги над попередньо використовуваними методами, що побудовано на основі ВКБ-наближення. Особливо така перевага важлива для глибоко підбар'єрних та навколобар'єрних енергій ядер, що розсіюються в пікноядерних реакціях. В цих областях енергії ВКБ-наближення перестає працювати, так що принципово треба враховувати квантові ефекти. Розроблена модель розсіяння протона на дейтроні на основі дво- та три-кластерних моделей цікава з точки зору глибшого дослідження ядерних сил. Автор дослідження наголошує, що порівнюючи розраховані перерізи гальмівного випромінювання з експериментально отриманими в таких процесах, є можливість уточнити ядерні сили в моделі дейтрона. Розроблена модель ядер для дослідження їх властивостей в середовищі компактних зір є доволі простою для узагальнень. Розвинутий підхід для опису компактних зір є доволі обмеженим, але є можливість використати інші моделі нейтронних зір та білих карликів, які краще враховують природу цих об'єктів. Запропонована модель є перспективною для дослідження ядерних сил та їх властивостей в екстремальних умовах.

5. Повнота викладення наукових положень, висновків і результатів в опублікованих працях.

Основні здобутки досліджень викладені в п'яти статтях у престижних наукових виданнях, що індексуються наукометричною базою SCOPUS. Три статті відносяться до першого квартилю, одна – до другого і одна – до четвертого. Статті досить повно висвітлюють наукові результати, покладені в основу дисертації, та методи їх отримання. Наукові публікації відповідають всім вимогам до присудження ступеня доктора філософії.

Також результати роботи висвітлені в п'яти тезах українських конференцій, на яких вони пройшли апробацію.

6. Дискусійні положення та зауваження до дисертаційної роботи.

В дисертаційній роботі в процес зіткнення частинок зводиться до одновимірних радіальних багаторазових процесів відбиття, що важко уявити навіть в білих карликах з малою густиною речовини всередині. В такому середовищі набагато доцільніше було б врахувати двох і трьох вимірні статистично усереднені зіткнення.

Здобувачем використовується газове рівняння стану та класичне наближення Лейна-Емдена, відоме як наближення слабкої гравітації. Таке наближення має обмежену область використання, особливо помилковим здається використання його всередині нейтронної зорі, які є дуже щільними компактними об'єктами. Також, нейтронні зорі більше нагадують краплину щільної рідини (або аморфного твердого тіла), ніж газ частинок.

Текст дисертації включає використання не зовсім вдалої термінології. «Кристалічні ґратки компактних зір» (стор. 16, 23), «спектр нульових коливань ядер» (стор. 33) - такі речення потребують додаткових пояснень. Деякі фрази, як наприклад «внутрішній шар, що являє собою рідину, яка являє собою кулонівський кристал» (стор. 78) не є зрозумілими. В дисертації присутні друкарські помилки та неточності пояснення. Наприклад, до формули (2.21) немає пояснення змінних введених величин (стор. 51).

При цьому вказані зауваження не є критичними і не змінюють загальну позитивну оцінку роботи.

7. Відповідність дисертації встановленим вимогам.

Дисертація оформлена відповідно до вимог, затверджених наказом Міністерства освіти і науки України від 12 січня 2017 р. №40, та містить всі необхідні структурні елементи. Усі використані матеріали, результати і висновки мають відповідні літературні посилання. Ознаки порушення автором вимог академічної доброчесності не спостерігаються.

8. Загальний висновок.

Представлена дисертація є самостійною, цілісною і завершеною науковою працею з чіткою постановкою задачі, описом методів досліджень та викладенням отриманих результатів. Робота відзначається належним високим професійним рівнем, а сформульовані в ній положення є обґрунтованими і достовірними. Зміст дисертації відповідає поставленим меті і завданням дослідження. Отримані результати достатньо вагомими, мають

наукову новизну, відносяться до актуальної тематики, пройшли необхідну апробацію та опубліковані належним чином.

Вважаю, що дисертаційна робота Шаульського Костянтина Андрійовича «Квантові релятивістські методи опису ядерних процесів у компактних зорях» відповідає спеціальності 104 «Фізика та астрономія» та вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44 та заслуговує на високу позитивну оцінку, а її автор Шаульський Костянтин Андрійович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія».

Рецензент:

доктор фізико-математичних наук,

старший науковий співробітник

відділу теорії ядра

Інституту ядерних досліджень

НАН України

Олександр Григорович МАГНЕР